

## SYSTEME D'EQUILIBRAGE D'UN DISPOSITIF DE STOCKAGE D'ENERGIE

La présente invention concerne un système d'équilibrage d'un dispositif de stockage d'énergie, notamment à base de cellules de batterie rechargeable, telles des cellules électrochimiques ou des supercapacités.

Ces dispositifs de stockage sont couramment utilisés dans les milieux industriels et aéronautique, comme source d'énergie de secours, lorsque le réseau d'alimentation est défectueux, ou au démarrage. Il est très important de maintenir ces dispositifs en état de charge complète, car ils doivent être opérationnels sur demande. Ceci suppose une surveillance de leur charge avec déclenchement de leur recharge le cas échéant, et une recharge après usage.

Ces dispositifs comprennent habituellement une pluralité d'éléments de stockage identiques connectés en série, par exemple des cellules électrochimiques ou des supercapacités. Le nombre d'éléments dépend de l'application visée : typiquement 24 volts dans le domaine industriel, 28 volts dans le domaine de l'aéronautique et 42 volts dans le domaine de l'automobile. Si on prend des cellules de type lithium-ion (4 volts pour une cellule chargée) et une application aéronautique, un dispositif de stockage d'énergie comprend ainsi typiquement 7 éléments. Un chargeur, comprenant un convertisseur de puissance alimenté par le réseau principal et dont la sortie est régulée en tension et en courant, permet de charger les cellules qui sont connectées en série.

Les éléments de stockage utilisés sont tels que la tension à leur bornes est fonction de l'état de charge. De manière connue, ces éléments de stockage supportent mal les surcharges et/ou les décharges trop importantes. Si on prend l'exemple de cellules de batterie rechargeable de type lithium-ion, ces cellules ont des performances énergiques et massiques très intéressantes, mais posent des problèmes de gestion de leur charge au fur et à mesure de leur exploitation. Ceci est gênant pour des applications dans lesquelles une longue durée et une grande fiabilité sont recherchées. Notamment, ces cellules sont très sensibles aux surtensions, ce qui nécessite un contrôle de la tension aux bornes de chaque cellule. Si on prend l'exemple des supercapacités qui sont des capacités obtenues par des

## 2

empilements de films minces, et qui se caractérisent par une faible tension (de l'ordre du volt à quelques volts), et une valeur de capacité très élevée, de l'ordre de plusieurs farads, la tension aux bornes de chaque capacité peut se décaler par rapport à celle des autres capacités en raison de différence de  
5 valeurs et ou de courants de fuite.

Mis en série, les éléments de stockage ne vont donc pas tous se comporter de la même façon : ils peuvent être dans un état de charge initial différent ; certains peuvent avoir des courants de fuite ; d'autres une capacité de stockage énergétique différente, soit due à une dispersion initiale  
10 naturelle entre éléments soit due à un vieillissement. Toutes ces différences de comportement se traduisent par un temps de recharge et des tensions qui varient. Si on gère la recharge du dispositif de stockage en observant la tension à ses bornes, si une cellule se recharge plus vite que les autres, elle va se retrouver en surcharge (tension supérieure à 4 volts pour une cellule  
15 au lithium). Inversement, une cellule beaucoup plus lente à se recharger va se retrouver en sous-charge (tension en dessous de 3,5 volts pour une cellule au lithium). Dans les deux cas, ce sont des conditions très défavorables à la fiabilité de ces cellules, et par voie de conséquence, du dispositif de stockage lui-même. En outre, les différences d'état de charges  
20 qui peuvent exister initialement vont s'accroître au fil des cycles de charge/décharge, induisant un mauvais fonctionnement du dispositif, par dégradation prématurée de ses performances.

Pour ces différentes raisons, une gestion rigoureuse d'un tel dispositif de stockage d'énergie pour en améliorer la fiabilité ne peut se baser  
25 sur le seul contrôle de la tension disponible aux bornes terminales du dispositif. On utilise ainsi une unité de contrôle de batterie généralement dénommée BMU selon l'acronyme anglais pour "*Battery Monitoring Unit*", qui agit comme un mécanisme de protection. Cette BMU vérifie que chacun des éléments de stockage ne dépasse pas une tension de seuil critique en  
30 charge et/ou décharge. En outre, elle contrôle l'activation d'un système d'équilibrage des éléments série du dispositif de stockage d'énergie. La fonction d'un tel système d'équilibrage est de maintenir une tension identique sur tous les éléments de stockage. Le principe de base de l'équilibrage consiste en la surveillance par la BMU de toutes les différences de tension  
35 entre les éléments série du dispositif de stockage, pour déclencher le

## 3

système d'équilibrage dès que au moins une de ces différences de tension dépasse une certaine valeur critique. Par exemple, si on dépasse 60 millivolts entre l'élément de stockage le plus chargé et l'élément de stockage le moins chargé, le système d'équilibrage est déclenché. Le système d'équilibrage sera arrêté lorsque la différence de tension repassera à une valeur acceptable, par exemple 30 millivolts. Le principe de base du rééquilibrage est de prélever une quantité d'énergie sur le ou les éléments les plus chargés pour la dissiper ou la transférer sur les éléments qui sont le moins chargés. En aéronautique, un tel système d'équilibrage gagne à pouvoir équilibrer les charges tant en mode de charge qu'en mode d'attente d'utilisation de la réserve d'énergie, ceci afin d'en augmenter la disponibilité.

Un système d'équilibrage de l'état de la technique est représenté sur la figure 1. Dans cet exemple, le dispositif de stockage d'énergie 1 comporte  $n=6$  éléments de stockage en série,  $C_1$  à  $C_6$ . Le système d'équilibrage des tensions consiste à prévoir  $n-1$  modules de transfert de charge bidirectionnelle identiques, chaque module de transfert de charge  $M_{i,i+1}$  étant affecté à deux éléments de stockage d'énergie  $C_i$  et  $C_{i+1}$  connectés en série : Dans l'exemple on a ainsi un module  $M_{1,2}$  qui appaire les éléments de stockage  $C_1$  et  $C_2$  pour effectuer le cas échéant un transfert de charge entre ces deux éléments.

Les modules de transfert de charge sont commandés (com) par le système de gestion de charge BMU, quand ce dernier détecte un trop grand écart de tension entre deux éléments de stockage du réseau série. Quand ils sont activés, chaque module de transfert de charge assure un transfert de charge entre les deux éléments de stockage ainsi appairés, en injectant un courant proportionnel à la différence de tension entre les deux éléments de stockage vers l'élément de stockage présentant la tension à ses bornes la plus faible. Un module de transfert de charge  $M_{i-1,i}$  associé à la paire d'éléments de stockage  $C_{i-1}$ ,  $C_i$ , peut par exemple être réalisé par un circuit électronique de type tripôle à pompe de charge comme illustré sur la figure 2. Ce circuit comprend trois bornes AB et G. L'élément de stockage Q est connecté entre les bornes A et G, et l'élément de stockage  $C_{i-1}$  est connecté entre les bornes G et B, le point G étant ainsi connecté au nœud de connexion entre les deux éléments adjacents Q et  $C_{i-1}$ . Ce circuit tripôle comprend dans cet exemple de réalisation, un condensateur de charge 2 et

deux paires d'interrupteurs haut et bas (T1, B1) (T2, B2), par lesquels le condensateur est alternativement connecté en parallèle sur un élément de stockage,  $C_i$ , par les bornes A et G, puis sur l'autre  $C_{i+1}$ , par les bornes G et B. La commutation des interrupteurs suit la fréquence horloge du signal de commande com, fourni par la BMU. L'application d'un signal de commande com de type binaire, à la fréquence  $f$ , provoque la commutation alternative des deux paires, la première paire (T1, B1) sur le niveau haut ("1") du signal com et la deuxième paire (T2, B2) sur le niveau bas ("0").

Un inconvénient d'un tel système d'équilibrage est que l'excédent d'énergie sur un élément de stockage est transféré sur l'élément de stockage adjacent, et ainsi de suite selon un mode de transfert chaîné, l'arrangement des modules de transfert de charge correspondant à la structure série des éléments de stockage.

Sur le plan énergétique, ce n'est pas très bon : si le premier module assure un rendement énergétique de 90%, on perd 10% de module en module.

En outre les modules de transfert de charge sont généralement dimensionnés pour passer une certaine quantité d'énergie correspondant typiquement à celle due à un seul élément déséquilibré dans le réseau. Si deux éléments sont déséquilibrés dans le réseau, le module est ainsi limité par sa capacité en courant. Aussi, le temps d'équilibrage du réseau série sera-t-il deux fois plus long.

Un but de l'invention est de proposer un système d'équilibrage optimal de  $n$  éléments série d'un dispositif de stockage d'énergie, ce système d'équilibrage pouvant être activé tant en mode de charge qu'en mode d'utilisation de la réserve d'énergie.

Ce but est atteint par un système d'équilibrage comprenant  $h$  modules de transfert de charges bidirectionnel. Selon l'invention, à chaque élément de stockage est associé  $p$  modules, chaque module appairant ledit élément de stockage à un autre élément de stockage du dispositif de stockage d'énergie.

Il en résulte pour chacun des  $n$  éléments de stockage du dispositif de stockage d'énergie, un transfert de charge correspondant à un courant proportionnel à la moyenne de tension sur les  $p$  éléments associés.

## 5

Les modules de transfert sont plus nombreux, mais sont aussi plus petits, puisque pour chaque élément de stockage du réseau, le transfert de charge est distribué par  $p$  modules.

L'équilibrage du réseau converge aussi plus rapidement.

5 Ainsi l'invention concerne un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau.

10 Selon l'invention, un système d'équilibrage optimal est obtenu en prévoyant que le transfert de charge sur chacun des  $n$  éléments du réseau est distribué sur chacun des  $n-1$  autres éléments du réseau série. Ceci est atteint en associant à chacun des  $n$  éléments de stockage,  $n-1$  modules de transfert, chaque module étant associé à un parmi les  $n-1$  autres éléments  
15 de stockage.

Un tel système nécessite  $n(n-1)/2$  modules de transfert de charge.

L'invention concerne ainsi un dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de  
20 charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, caractérisé en ce que qu'il comprend  $n(n-1)/2$  modules identiques, chaque élément de stockage étant appairé à chacun des autres  $n-1$  éléments de stockage du réseau par  $(n-1)$  modules associés.

25 Selon un autre aspect de l'invention, pour le cas où  $n=2^m$ , on prévoit avantageusement que le dispositif comprend  $n-1$  modules de type tripôle, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de rang  $i$  correspond  $2^i$  modules, chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  
30  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module du groupe de rang 0.

Selon un autre aspect de l'invention, pour le cas où  $n=2^m-x$ , caractérisé en ce qu'il comprend un nombre  $l$  de modules de type tripôle, avec  $n-1-x < l \leq n-1$  modules, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel  
35 qu'au groupe de rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules, chacun associé à  $n/2^i$

éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module du groupe de rang 0.

5

D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, faite à titre indicatif et non limitatif de l'invention et en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- 10 - la figure 1 illustre un système d'équilibrage selon l'état de la technique;
- la figure 2 illustre un exemple de module de transfert de charge qui peut-être utilisé dans un système d'équilibrage;
- la figure 3 illustre un premier mode de réalisation d'un système  
15 d'équilibrage selon l'invention;
- la figure 4 illustre un exemple de module de transfert de charge qui peut-être utilisé dans un système d'équilibrage selon l'invention;
- la figure 5 illustre un autre mode de réalisation d'un système de rééquilibrage selon l'invention;
- 20 - les figures 6a, 6b et 6c illustrent le phénomène d'équilibrage obtenu avec un système d'équilibrage tel que représenté sur la figure 5; et
- les figures 7a et 7b illustrent le gain de temps d'équilibrage obtenu avec un système d'équilibrage selon l'invention (fig.7a) par rapport à un système selon l'état de la technique (fig.7b) et
- 25 - la figure 8 représente une variante de réalisation du système de rééquilibrage de la figure 5.

Un système d'équilibrage selon l'invention comprend  $h$  modules de transfert de charge,  $h \geq n-1$ .

Le principe de base de l'invention est pour chaque élément de  
30 stockage du réseau série, de distribuer le transfert de charge sur  $p$  éléments,  $p \leq n-1$ .

Soit  $C_i$  un élément de stockage.  $p$  modules de transfert de charge lui sont associés, chaque module appairant cet élément  $C_i$  avec un autre élément de stockage du dispositif. Chaque module assure ainsi un transfert  
35 direct d'une partie de l'énergie entre l'élément  $C_i$  et chacun des  $p$  éléments

## 7

qui lui sont appairés. Le courant injecté est ainsi proportionnel à la différence de tension entre l'élément  $C_i$  et la moyenne des tensions aux bornes des  $p$  autres éléments.

Les modules de transfert de charge doivent être dimensionnés en  
5 nombre et en gain en courant pour qu'au final, l'énergie à transférer se trouvent distribuée sur tous les éléments.

Un premier mode de réalisation de l'invention est représenté sur la figure 3. Dans ce mode de réalisation, on a  $p = n-1$ . Le nombre total de  
10 modules est ainsi égal à  $n(n-1)/2$ .

Chaque élément de stockage  $C_i$  est appairé avec chacun des  $n-1$  autres éléments du dispositif de stockage par un module de transfert de charge propre. Cet arrangement combinatoire est représenté sur la figure 3 en utilisant la représentation dite triangle de pascal. Les éléments de  
15 stockage d'énergie  $C_1$  à  $C_7$  sont représentés sur la diagonale. Dans le triangle pascal, on trouve les  $n(n-1)/2$  modules de transfert de charge qui permettent de relier chacun des éléments de la diagonale à un autre élément de cette diagonale.

Par exemple, l'élément  $C_7$  est appairé :

- 20
- à l'élément  $C_6$ , par le module  $M_{7,6}$ ;
  - à l'élément  $C_5$ , par le module  $M_{7,5}$ ;
  - à l'élément  $C_4$ , par le module  $M_{7,4}$ ;
  - à l'élément  $C_3$ , par le module  $M_{7,3}$ ;
  - à l'élément  $C_2$ , par le module  $M_{7,2}$ ;

25

  - à l'élément  $C_1$ , par le module  $M_{7,1}$ .

Cet arrangement suppose l'utilisation comme module de transfert de charge des circuits électroniques de type tripôle comme représenté sur la figure 2, pour appairer deux éléments adjacents, et de type quadripôle pour appairer deux éléments distants. Un tel circuit électronique de type  
30 quadripôle est représenté sur la figure 4, dans un exemple de transfert de charge bidirectionnel linéaire effectué par pompe de charge au moyen d'un condensateur comme dans l'exemple de tripôle de la figure 2. Ce quadripôle a alors quatre bornes  $ABG_1G_2$ , les bornes  $G_1, G_2$  étant connectées au même point dans le cas d'éléments adjacents, équivalant à des tripôles.

## 8

Le principe de régulation se fait ainsi pour chaque élément de stockage par transfert direct sur chacun des  $n-1$  autres éléments, au moyen d'un courant proportionnel à la différence de tension entre cet élément et la moyenne de tension aux bornes des autres  $n-1$  éléments :  $I=k \cdot \Delta V$ .

5 Si on suppose que l'on a un excès de tension  $\Delta V$  sur l'élément  $C_4$ , les autres éléments de stockage étant tous à la même tension  $V$ , un transfert de charge va s'effectuer depuis l'élément  $C_4$  vers les autres éléments  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ , et  $C_7$  en sorte que chacun de ces 6 éléments reçoive un courant de  $k \frac{\Delta V}{7}$ . Dans le même temps, l'élément  $C_4$  se voit prélever un courant de  
 10  $k \frac{6\Delta V}{7}$ . Ces courants injectés et prélevés vont faire s'équilibrer à terme la tension aux bornes des différentes cellules. Lorsque l'équilibrage est réalisé, chaque élément a une tension de  $V + \frac{\Delta V}{7}$  à ses bornes.

En pratique, l'équilibrage se fait pour tous les éléments en même temps. Les modules de transfert sont sollicités tous en même temps, une  
 15 seule fois, en parallèle. On arrive à l'équilibrage de façon beaucoup plus rapide.

C'est ce qui est illustré sur les figures 7a et 7b, pour un dispositif de stockage d'énergie, partant d'un état de charge initial nul, ayant une cellule de capacité énergétique 5% plus faible que celle des autres cellules.

20 La figure 7b correspond à un système d'équilibrage à structure des modules chaînée, selon l'état de la technique (Figs 1 et 2). Les courbes 10 et 11 représentent les valeurs minimales et maximales du courant de compensation des cellules normales. La courbe 12 représente le courant de charge commun à toutes les cellules en provenance du chargeur de batterie.  
 25 On y distingue une phase de régulation à courant constant suivie d'une décroissance exponentielle de ce courant de charge lorsque le chargeur passe d'une régulation en mode courant à une régulation en mode tension. Les courbes 13 et 14 montrent l'enveloppe d'évolution des tensions aux bornes de chaque cellule. L'équilibre est atteint vers  $t=240$  mn.

30 La figure 7a, montre qu'un système d'équilibrage selon l'invention permet d'atteindre l'équilibre beaucoup plus rapidement, vers  $t=120$  mn.

Dans ce premier exemple de réalisation d'un système d'équilibrage d'énergie d'un dispositif comprenant  $n$  éléments de stockage



d'énergie en série,  $n(n-1)/2$  modules sont nécessaires, tous identiques, c'est à dire dimensionnés à l'identique pour passer le même courant  $I_{max}$ .

Les figures 5 et 6a à 6c concernent un autre mode de réalisation d'un système d'équilibrage selon l'invention, par lequel le nombre de modules nécessaire est réduit à  $n-1$  quand  $n$  est une puissance de 2, soit  $n=2^m$ . Les modules sont alors tous de type tripôle ABG.

Cette réduction est obtenue en utilisant la réduction en base deux du nombre  $n$  d'éléments de stockage du réseau série.

On rappelle qu'un module de transfert de type tripôle fournit un courant  $I$  proportionnel à la différence de tension  $V_{AG}-V_{GB}$ . On note  $k$  ce facteur de proportionnalité :  $I = k [V_{AG}-V_{GB}]$ .

Selon l'invention, on a alors  $m$  groupes de module de transfert, de rang 0 à  $m-1$ . Chaque groupe de rang  $i=0$  à  $m-1$  comprend  $2^i$  modules. Chaque module de ce groupe de rang  $i \neq 0$  est dimensionné pour avoir un gain en courant  $k_i$   $2^i$  fois plus important que le module du groupe de rang 0. Chaque module est connecté en parallèle sur un groupe de  $n/2^i$  éléments de stockage arrangés en deux ensembles de manière à former une paire.

Plus particulièrement, si on prend l'exemple représenté sur la figure 5, avec  $n=8=2^3$  éléments de stockage en série. Dans cet exemple, on a  $m=3$ . On a ainsi  $m=3$  groupes de modules  $GM^0$ ,  $GM^1$ ,  $GM^2$  de rang respectivement 0, 1 et 2.

Le groupe  $GM^0$ , de rang 0, comprend  $2^0=1$  module de transfert, noté  $M0$ , connecté entre les bornes terminales du réseau (en parallèle sur les  $n$  éléments de stockage).

Le groupe de rang 1, comprend  $2^1=2$  modules de transfert, notés  $M1_0$  et  $M1_1$ . Chaque module est connecté en parallèle sur  $n/2^1=4$  éléments de stockage série arrangés en deux ensembles de chacun deux éléments, pour former une paire. Chaque module est dimensionné pour avoir un gain en courant  $2^1$  fois plus important que le module  $M0$ .

On a ainsi  $M1_0$  connecté en parallèle sur  $C_5, C_6, C_7, C_8$ , avec le point de référence  $G$  du tripôle connecté au point milieu  $N_6$  de cet ensemble série (entre  $C_6$  et  $C_7$ ). De même,  $M1_1$  est connecté en parallèle sur  $C_1, C_2, C_3, C_4$ ,

## 10

avec le point de référence G du tripôle connecté au point milieu  $N_2$  de cet ensemble série (entre  $C_2$  et  $C_3$ ).

Le groupe de rang 2, comprend  $2^2=4$  modules de transfert, notés  $M2_0$  à  $M2_3$ . Chaque module est connecté en parallèle sur  $n/2^2=2$  éléments  
5 de stockage série qui forment une paire. Ils ont un gain en courant  $2^2$  plus important que le module  $M0$ .

Par exemple le module  $M2_0$  est connecté en parallèle sur  $C_7$  et  $C_8$ , avec le point de référence G connecté au point milieu  $N_7$  de connexion entre ces deux éléments. Les autres modules de ce groupe, respectivement  $M2_1$ ,  $M2_2$   
10 et  $M2_3$  sont connectés de façon similaire, respectivement sur  $(C_6, C_5)$ ,  $(C_4, C_3)$  et  $(C_2, C_1)$ .

Comme dans le premier mode de réalisation, les modules de transfert sont tous sollicités en même temps, une seule fois, pour réaliser l'équilibrage. On obtient des performances identiques. La différence tient au  
15 nombre de modules réduit.

Un exemple d'équilibrage de charge est représenté sur la figure 6a, pour un dispositif de stockage conforme à la figure 5, avec  $n=8$  éléments de stockage, dans un exemple où tous les éléments ont une tension  $V_n$  à leurs bornes, sauf un, dans l'exemple  $C_5$ , qui a une tension  $V_n+\Delta V$ .

20 Les modules du groupe  $GM^2$  opèrent par paires d'éléments adjacents, représentées sur la figure par des rectangles le long de la colonne  $GM^2$ . Pour les paires d'éléments équilibrées, le transfert est nul. Pour la paire a contenant l'élément  $C_5$ , le transfert peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'élément  $C_5$  et une quantité de charge  
25 positive  $+Q$  transférée sur l'élément  $C_6$ . Pour marquer le gain de quatre affecté aux modules de cette colonne, on écrit  $+Q=+4$  et  $-Q=-4$ .

Les modules du groupe  $GM^1$  opèrent chacun sur quatre éléments adjacents, arrangés en deux ensembles de deux éléments pour former une paire. Chaque paire est représentée sur la figure par un rectangle dans la  
30 colonne  $GM^1$ . La paire  $\{(C_1, C_2), (C_3, C_4)\}$  est équilibrée, le transfert est nul pour cet ensemble. Pour la paire b  $\{(C_5, C_6), (C_7, C_8)\}$  contenant l'élément  $C_5$ , le transfert peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'ensemble série  $(C_5, C_6)$  et une quantité de charge positive  $+Q$  transférée sur l'ensemble série  $(C_7, C_8)$ . Pour marquer le gain de deux  
35 affecté aux modules de cette colonne, on écrit  $+Q=+2$  et  $-Q=-2$ .

## 11

Le module du groupe  $GM^0$  opère sur les huit éléments adjacents, arrangés en deux ensembles de quatre éléments pour former une paire  $c$  représentée sur la figure par un rectangle le long de la colonne  $GM^0$  :  $\{(C_1, C_2, C_3, C_4), (C_5, C_6, C_7, C_8)\}$ . Cette paire  $c$  contenant l'élément  $C_5$ , le transfert  
 5 peut s'écrire comme une quantité de charge négative  $-Q$  prélevée sur l'ensemble série  $(C_5, C_6, C_7, C_8)$  et une quantité de charge positive  $+Q$  transférée sur l'ensemble série  $(C_1, C_2, C_3, C_4)$ . Pour marquer que ce module sert de référence pour le gain en courant, ce qui revient à dire que l'on attribue un gain unité à  $M0$ , on écrit  $+Q=+1$  et  $-Q=-1$ .

10 La colonne  $\Sigma 1$  représente la somme des charges transférées sur chaque élément du réseau. La quantité de charge prélevée sur l'élément  $C_5$  est distribuée sur chacune des autres éléments qui reçoit donc une quantité de charge égale à la quantité de charge prélevée divisée par le nombre d'éléments sur lesquels elle est distribuée.

15 Ce transfert se fait en sollicitant tous les modules du système d'équilibrage en même temps, en parallèle, d'où un gain en temps d'équilibrage particulièrement avantageux.

Ce mode de réalisation d'un système d'équilibrage selon l'invention avec un nombre réduit de modules de transfert de charge vient  
 20 d'être décrit dans un exemple de dispositif de stockage d'énergie contenant un nombre  $n$  d'éléments s'exprimant comme une puissance de deux :  $n=2^m$ .

Dans le cas où  $n$  est un entier quelconque qui s'écrit :  $n=2^m-x$ , on montre que l'on peut réaliser un système d'équilibrage de ce type, en utilisant  
 25  $x$  éléments de stockage virtuels pour construire la structure du système. En pratique, on obtient un système d'équilibrage comprenant  $l$  modules, avec  $l$  entier tel que  $n-1-x \leq l \leq n-1$ .

Si on reprend la figure 5. Dans les éléments de stockage  $C_1$  à  $C_8$  représentés, on considère maintenant que le dispositif de stockage ne  
 30 comprend que 7 éléments, ce qui est généralement le cas pour les applications de l'aéronautique (avec des cellules lithium-ions).

Le nombre réel d'éléments est donc  $n=7$ . On a  
 $2^{m-1} \leq n \leq 2^m$ , ou encore  $n=2^m-1$ .

On conçoit alors la structure en rajoutant 1 cellule virtuelle qui est  
 35  $C_8$  sur la figure 5.

## 12

Cet élément virtuel n'existe pas en réalité dans la structure. Le dispositif de stockage 100 avec ces  $n=7$  éléments  $C_1$  à  $C_7$  et son système d'équilibrage est en réalité comme représenté sur la figure 8. Les bornes A des modules  $M2_0$ ,  $M1_0$  et  $M0_0$  sont reliées en commun au moyen d'une ligne de connexion X. Le potentiel VX sur cette ligne X est dans un état indéfini initialement. On montre que lorsque le système d'équilibrage est activé, le système d'équilibrage est tel qu'il établit le potentiel VX à un niveau tel que le courant qui est induit dans l'élément virtuel  $C_8$  est forcément nul. C'est ce qui est représenté dans les tableaux des figures 6b et 6c, à prendre en combinaison avec celui de la figure 6a.

On a vu que le tableau de la figure 6a illustre le cas d'un dispositif à  $n=8$  éléments, dans lequel le système d'équilibrage a été activé sur détection d'un déséquilibre, dû à un excès de charge sur l'élément  $C_5$ . Le transfert de charge total qui s'établit pour chaque cellule est donné dans la colonne  $\Sigma 1$  ce tableau, a déjà été expliqué.

Or on se place dans le cas où l'élément  $C_8$  est virtuel : le courant dû au transfert de charge provoqué par le système d'équilibrage doit donc être nul dans cet élément.

On montre que le potentiel VX sur la ligne X s'établit automatiquement à une valeur donnée pour que ce soit effectivement le cas. C'est comme si le système se comportait en sorte que l'élément virtuel induise lui aussi un transfert de charge, tel que la somme des deux transferts de charge, celui dû à  $C_5$  et celui dû à l'élément virtuel s'annule pour l'élément virtuel. Le tableau de la figure 6b montre le transfert de charge qui serait dû à l'élément virtuel. La colonne  $\Sigma 2$  donne le transfert de charge total qui s'établit pour chaque cellule.

La colonne  $\Sigma = \Sigma 1 + \Sigma 2$  dans le tableau de la figure 6c représente la superposition des deux transferts : on obtient bien un transfert nul sur l'élément virtuel. Le transfert de charge se distribue de l'élément  $C_5$  sur les 6 autres éléments du dispositif de stockage 100. La tension aux bornes de la cellule virtuelle s'établit donc à  $V_n + \Delta V/7$ .

Dans l'exemple de la figure 8, le système d'équilibrage se construit sur la base d'un seul élément virtuel. Dans le cas général où  $n=2^m-x$ , avec  $x \geq 1$ , il y a  $x$  éléments virtuels.

Dans le cas où  $x > 1$ , le système d'équilibrage peut se simplifier en éliminant du système tout module qui aurait toutes ses bornes A, B, G reliées à des éléments virtuels. On a alors  $l$  modules avec  $n-1-x < l \leq n-1$ . Dans ce cas, les  $l$  modules sont distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au  
5 groupe de rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules ( $M1_0, M1_1$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour passer  $2^i$  fois plus de courant que le module  $M0$ .

10 L'invention qui vient d'être décrite est particulièrement intéressante pour tous les systèmes où l'on cherche à améliorer les performances du dispositif de stockage d'énergie à moindre coût.

L'invention s'applique à tout système d'équilibrage utilisant des modules de transfert de charge bidirectionnels et linéaires. En particulier,  
15 l'invention ne se limite pas à l'exemple aux modules du type à pompe de charge donné uniquement à titre d'illustration.

Dans toute la description, le module de transfert de charge a une caractéristique de transfert en courant linéaire lorsque les tensions des deux cellules qui lui sont connectées sont proches de l'équilibre. On parle de  
20 linéarité au premier ordre. Le système d'équilibrage de charge continuera de fonctionner correctement si le gain en courant n'est pas linéaire mais qu'il transfère un courant de même signe que la différence de tension aux bornes de cellules.

## REVENDECATIONS

1. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de  
5 stockage dudit réseau, caractérisé en ce que qu'il comprend  $n(n-1)/2$  modules identiques, chaque élément de stockage ( $C_k$ ) étant appairé à chacun des autres  $n-1$  éléments de stockage du réseau par  $(n-1)$  modules associés ( $M_{k,1}, M_{k,2} \dots M_{k,k-1}, M_{k,k+1} \dots M_{k,n-1}, M_{k,n}$ ).
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits  
10 modules sont du type tripôle ou quadripôle selon que les éléments qu'ils appairent sont adjacents ou non.
3. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module  
15 assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, et dans lequel  $n=2^m$ , caractérisé en ce qu'il comprend  $n-1$  modules de type tripôle, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de rang  $i$  correspond  $2^i$  modules ( $M_{i,0}, M_{i,1}$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire,  
20 les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module ( $M_{0,0}$ ) du groupe de rang 0.
4. Dispositif de stockage d'énergie comprenant un réseau série de  $n$  éléments de stockage ( $C_1, \dots, C_n$ ) apte à fournir une tension continue à ses  
25 bornes, et une pluralité de modules de transfert de charge, chaque module assurant un transfert de charge bidirectionnel entre deux éléments de stockage dudit réseau, et dans lequel  $n=2^m-x$ , caractérisé en ce qu'il comprend un nombre  $l$  de modules de type tripôle, avec  $n-1-x < l \leq n-1$  modules, distribués en  $m-1$  groupes de rang 0 à  $m-1$ , tel qu'au groupe de

rang  $i$  correspond au plus  $2^i$  modules ( $M1_0, M1_1$ ), chacun associé à  $n/2^i$  éléments arrangés en deux ensembles de manière à former une paire, les modules dudit groupe de rang  $i \neq 0$  étant dimensionnés pour avoir un gain en courant  $2^i$  fois plus important que le gain en courant du module ( $M0$ ) du groupe de rang 0.

5  
10 5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le transfert de charge entre ledit élément et les  $p$  éléments qui lui sont appairés se traduit par un courant de charge ou décharge de ces éléments appairés proportionnel au premier ordre à la différence entre la tension aux bornes dudit élément et la moyenne des tensions aux bornes desdits  $p$  éléments de charge appairés au dit élément.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en que lesdits éléments de stockage sont des cellules de batterie électrochimique.

15 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en que lesdits éléments de stockage sont des cellules de batterie de type lithium-ion.

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que lesdits éléments de stockage sont des supercapacités.

20 9. Système électronique comprenant un chargeur et un dispositif de stockage d'énergie selon l'une quelconque des revendications précédentes, rechargeable par ledit chargeur.

1/7

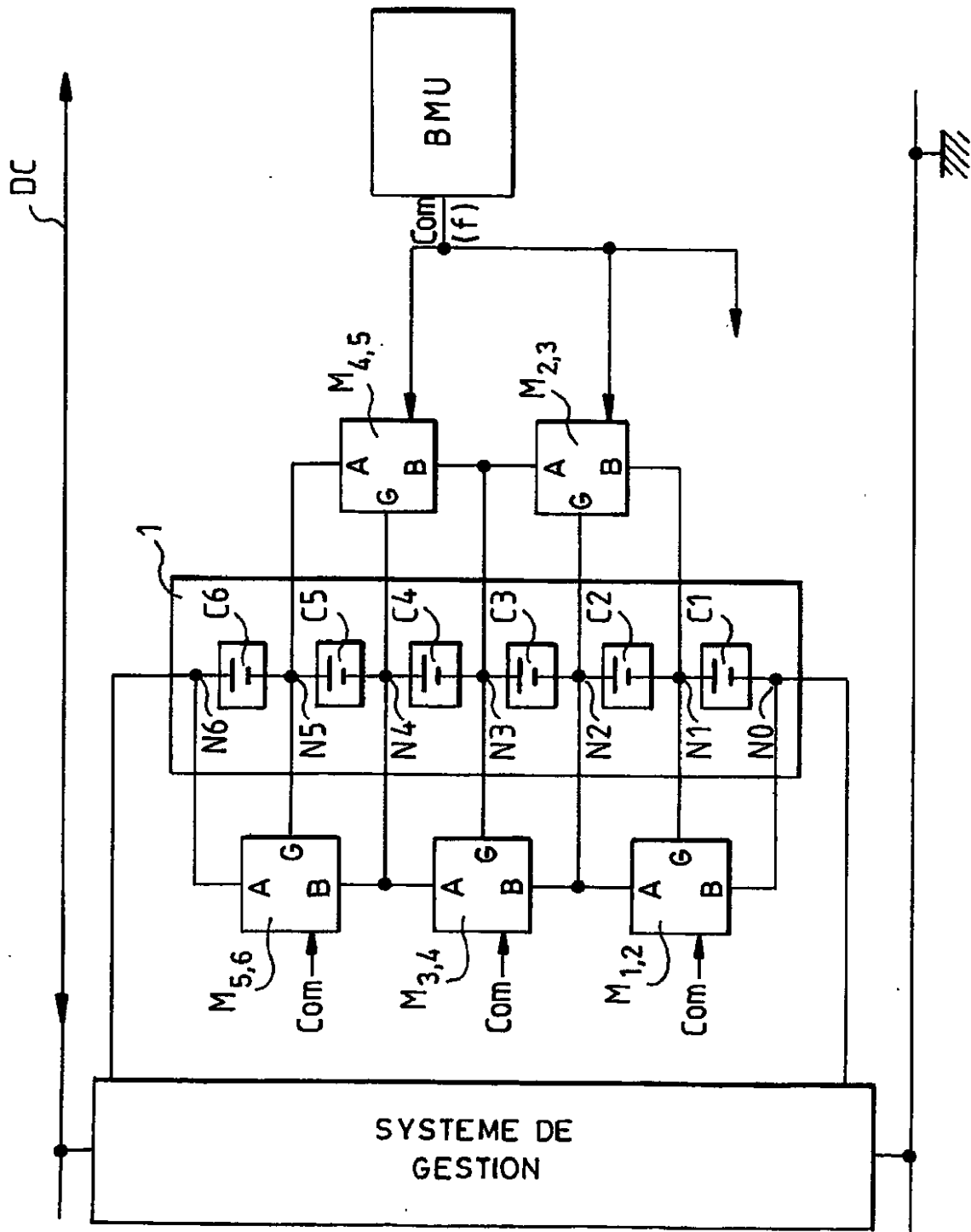


FIG.1



2/7

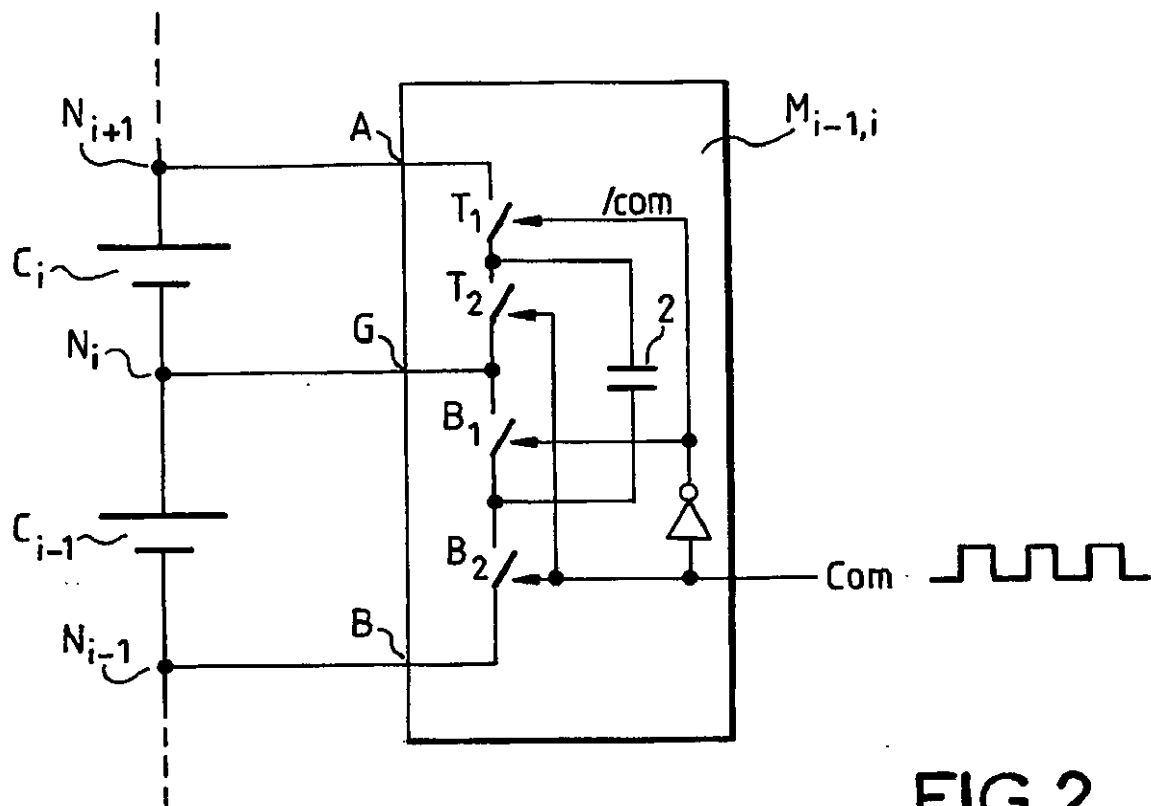


FIG. 2

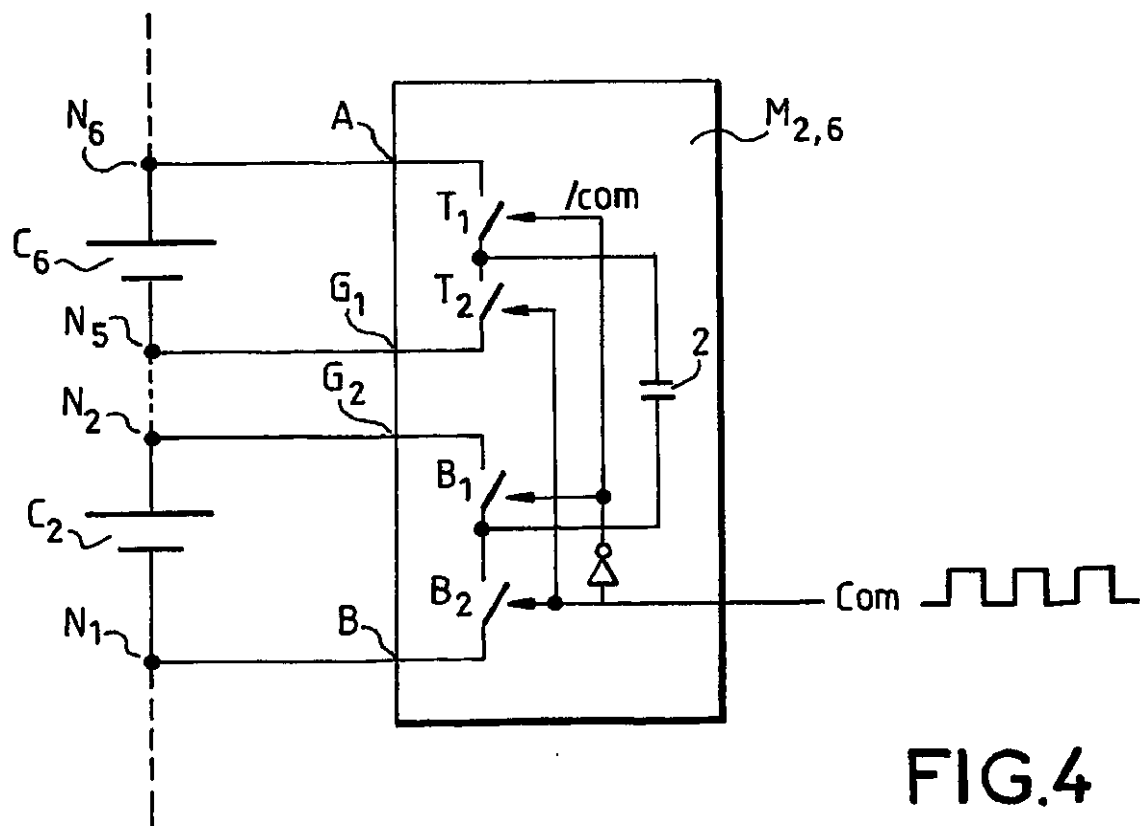
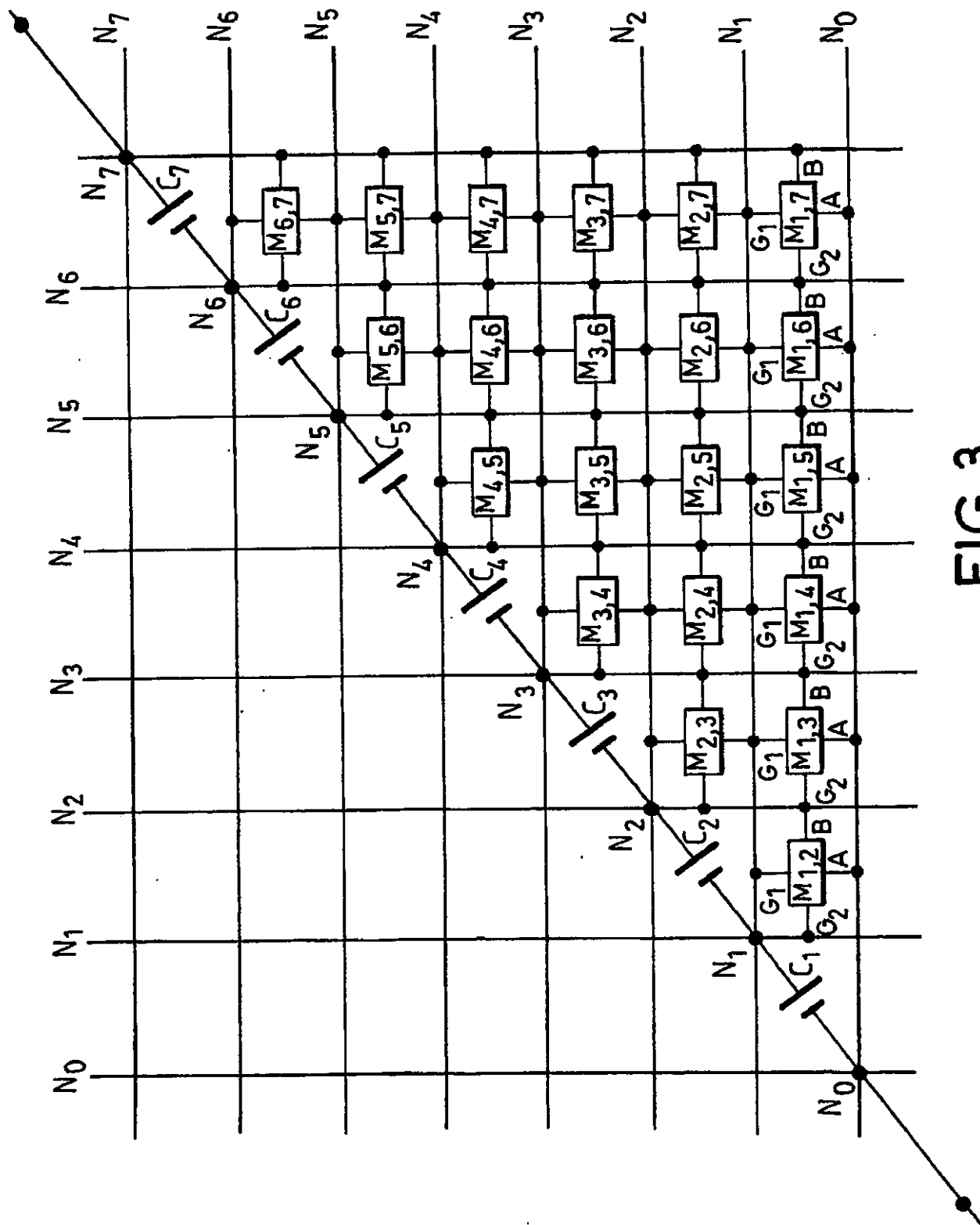


FIG. 4



4/7

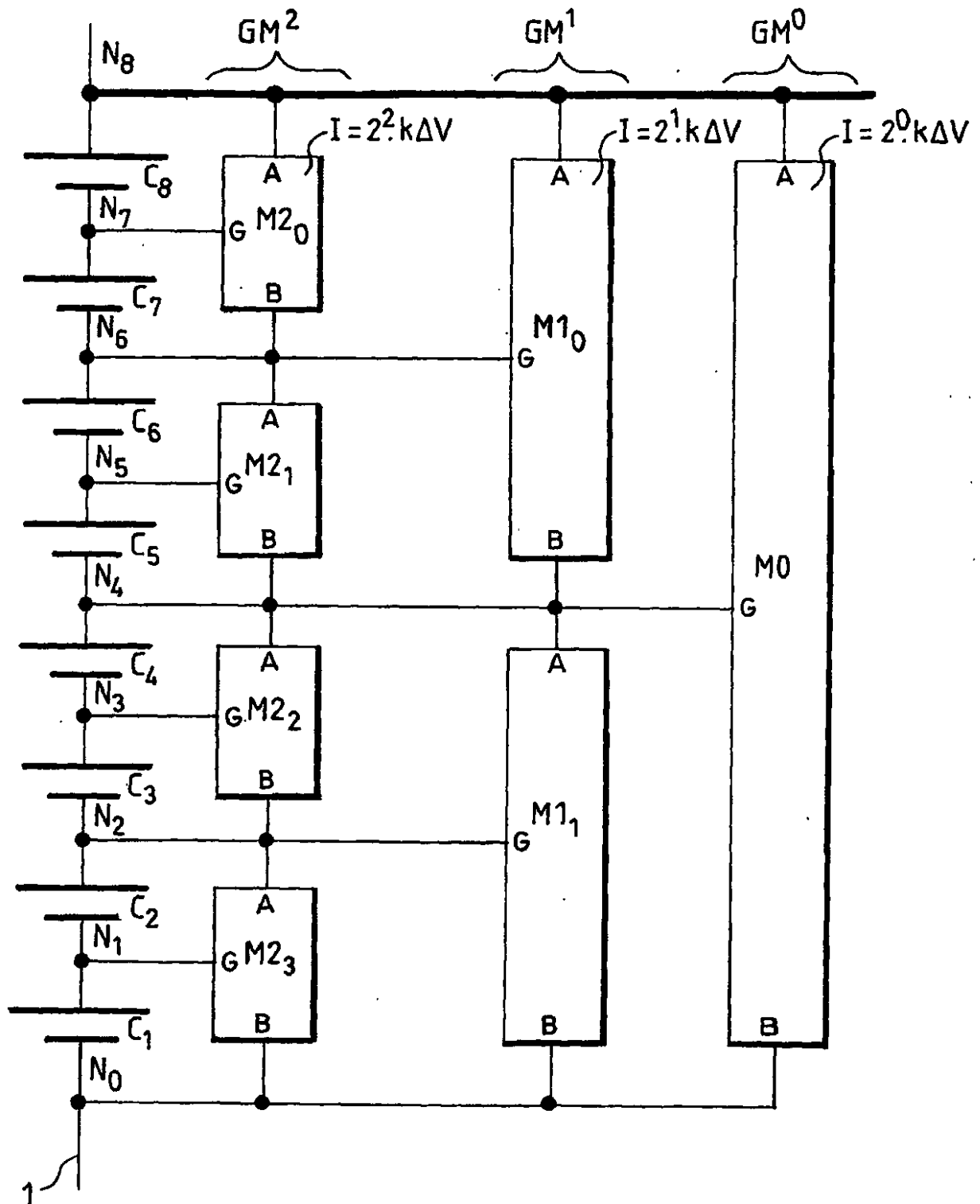


FIG.5

5/7

	$V(C_i)$	$GM^2$	$GM^1$	$GM^0$	$\Sigma_1$
$C_8$	$V_n$	0	+2 <sup>b</sup>	-1 <sup>c</sup>	+1
$C_7$	$V_n$	0	+2	-1	+1
$C_6$	$V_n$	+4 <sup>a</sup>	-2	-1	+1
$C_5$	$V_n + \Delta V$	-4	-2	-1	-7
$C_4$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_3$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_2$	$V_n$	0	0	+1	+1
$C_1$	$V_n$	0	0	+1	+1

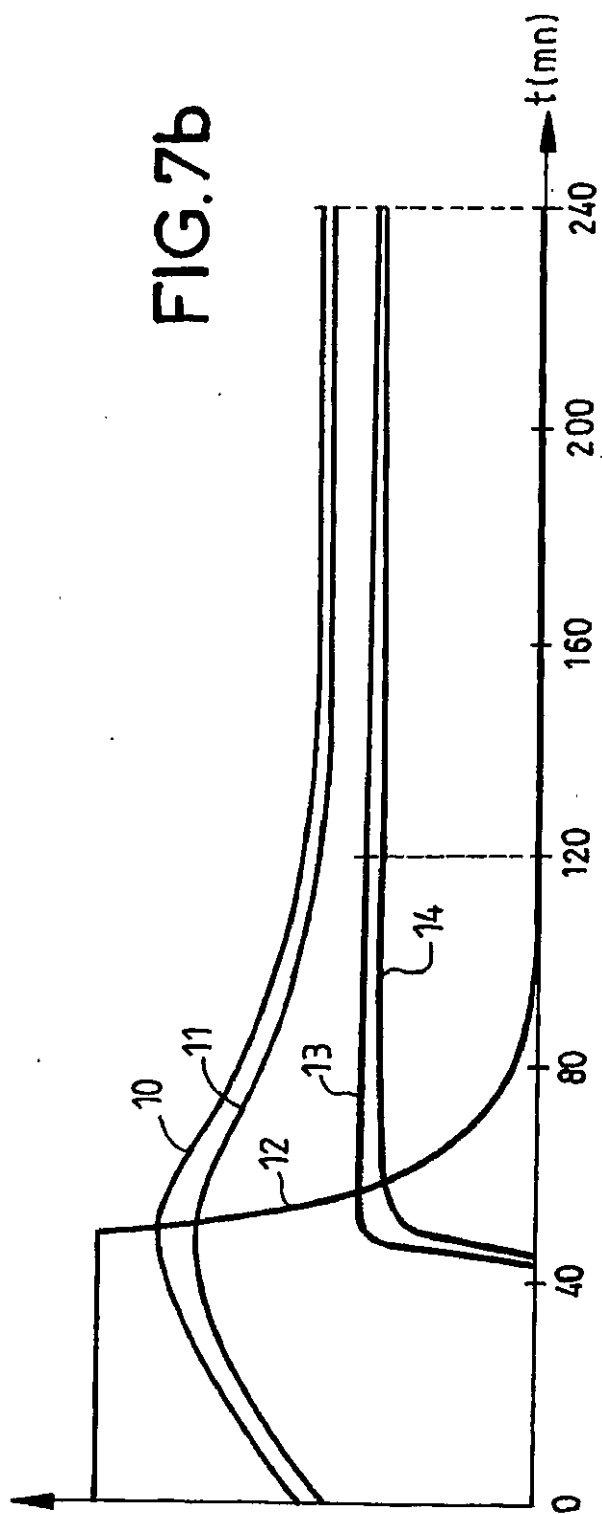
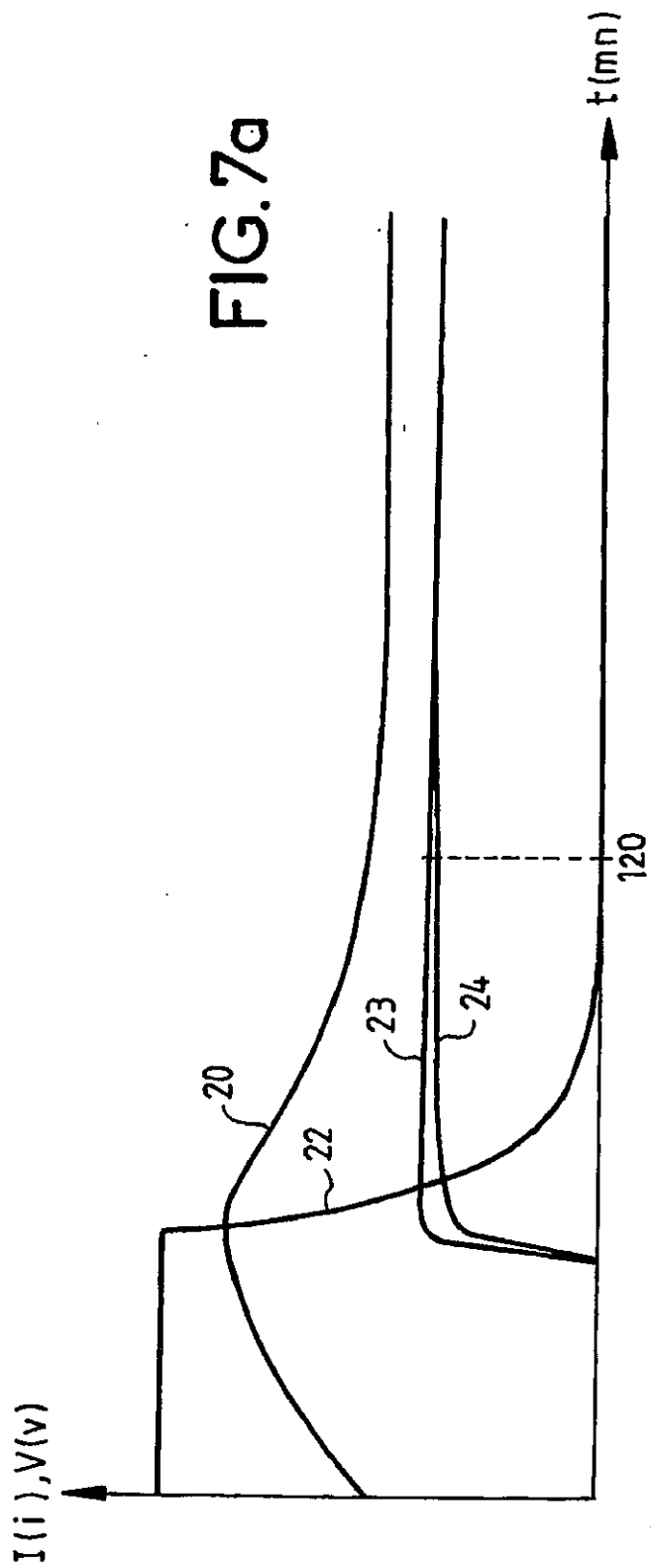
FIG.6a

	$V(C_i)$	$GM^2$	$GM^1$	$GM^0$	$\Sigma_2$
$C_8$	$V_n + \frac{\Delta V}{7}$	-4/7	-2/7	-1/7	-7/7
$C_7$	$V_n$	+4/7	-2/7	-1/7	-1/7
$C_6$	$V_n$	0	+2/7	-1/7	-1/7
$C_5$	$V_n$	0	+2/7	-1/7	-1/7
$C_4$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_3$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_2$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7
$C_1$	$V_n$	0	0	+1/7	-1/7

FIG.6b

	$V(C_i)$	$\Sigma_1$	$\Sigma_2$	$\Sigma$
$C_8$	$V_n + \frac{\Delta V}{7}$	+1	-7/7	0
$C_7$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_6$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_5$	$V_n + \Delta V$	-7	-1/7	-48/7
$C_4$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_3$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_2$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7
$C_1$	$V_n$	+1	-1/7	+6/7

FIG.6c



7/7

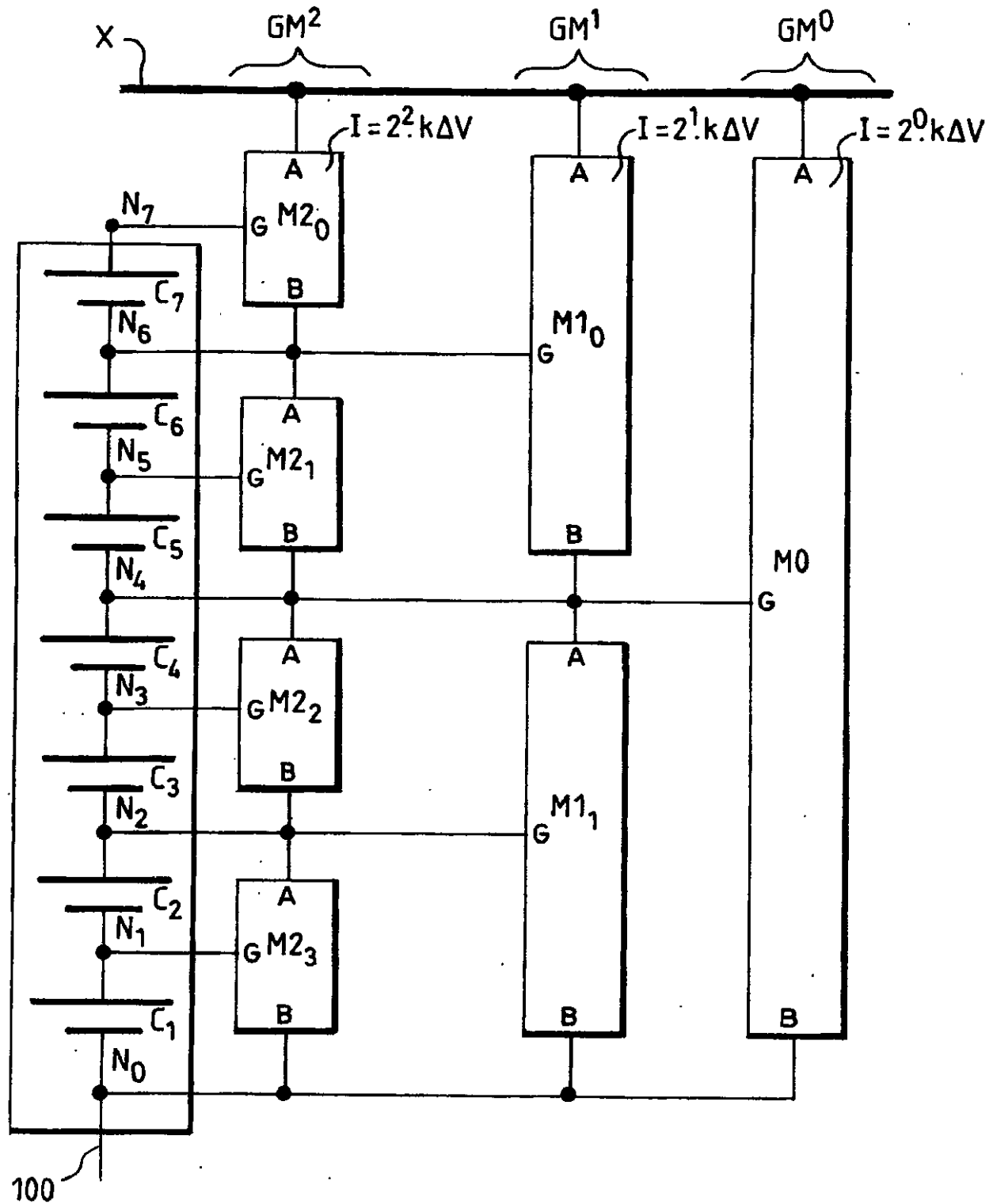


FIG. 8

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/EP2004/052325

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 H02J7/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 631 534 A (LEWIS DAVE) 20 May 1997 (1997-05-20) abstract; figure 1 column 1, line 33 - column 2, line 2 column 2, line 22 - line 48	1-3,6-9
X	US 5 592 067 A (PETER DAVID A ET AL) 7 January 1997 (1997-01-07) abstract column 10, line 12 - line 30; figure 3 ----- -/-	1-3,6-9



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

### \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \* & \* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

28 January 2005

Date of mailing of the international search report

08/02/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Lorenzo Feijoo, S

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No  
PCT/EP2004/052325

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	<p>US 2002/190692 A1 (MARTEN VICTOR)  19 December 2002 (2002-12-19)  abstract  paragraph '0002!  paragraph '0004!  paragraph '0030! - paragraph '0038!;  figure 2  paragraph '0044!</p>	1,3,6-9
X	<p>US 6 150 795 A (KUTKUT NASSER H ET AL)  21 November 2000 (2000-11-21)  abstract  column 5, line 34 - column 6, line 64  column 9, line 3 - line 39; figure 2</p>	1-3,6-9
A	<p>US 6 081 095 A (NAGATA TETSUYA ET AL)  27 June 2000 (2000-06-27)  abstract  column 15, line 33 - column 16, line 26;  claims 12,13; figure 18</p>	



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/052325

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5631534	A	20-05-1997	NONE	
US 5592067	A	07-01-1997	DE 69417385 D1 DE 69417385 T2 EP 0662744 A2 JP 7212984 A	29-04-1999 15-07-1999 12-07-1995 11-08-1995
US 2002190692	A1	19-12-2002	AU 3295201 A AU 3455101 A AU 3455201 A AU 3460901 A CA 2398730 A1 EP 1295397 A1 EP 1262015 A1 WO 0156008 A1 WO 0156163 A1 WO 0156062 A2 WO 0156145 A1 US 2002145477 A1 US 2003090331 A1 US 6486871 B1 US 2002171575 A1	07-08-2001 07-08-2001 07-08-2001 07-08-2001 02-08-2001 26-03-2003 04-12-2002 02-08-2001 02-08-2001 02-08-2001 02-08-2001 10-10-2002 15-05-2003 26-11-2002 21-11-2002
US 6150795	A	21-11-2000	AU 2469001 A CA 2390551 A1 EP 1230723 A1 JP 2003513605 T TW 512568 B WO 0133691 A1	14-05-2001 10-05-2001 14-08-2002 08-04-2003 01-12-2002 10-05-2001
US 6081095	A	27-06-2000	JP 11262188 A JP 2000083327 A FR 2776139 A1	24-09-1999 21-03-2000 17-09-1999

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/EP2004/052325

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE  
CIB 7 H02J7/00

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)  
CIB 7 H02J

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 5 631 534 A (LEWIS DAVE) 20 mai 1997 (1997-05-20) abrégé; figure 1 colonne 1, ligne 33 - colonne 2, ligne 2 colonne 2, ligne 22 - ligne 48	1-3,6-9
X	US 5 592 067 A (PETER DAVID A ET AL) 7 janvier 1997 (1997-01-07) abrégé colonne 10, ligne 12 - ligne 30; figure 3	1-3,6-9
X	US 2002/190692 A1 (MARTEN VICTOR) 19 décembre 2002 (2002-12-19) abrégé alinéa '0002! alinéa '0004! alinéa '0030! - alinéa '0038!; figure 2 alinéa '0044!	1,3,6-9

-/-

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

\* Catégories spéciales de documents cités:

- 'A' document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- 'E' document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- 'L' document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- 'O' document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- 'P' document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- 'T' document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- 'X' document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- 'Y' document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- 'Z' document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

28 janvier 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

08/02/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel: (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Lorenzo Feijoo, S

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/EP2004/052325

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 6 150 795 A (KUTKUT NASSER H ET AL) 21 novembre 2000 (2000-11-21) abrégé colonne 5, ligne 34 - colonne 6, ligne 64 colonne 9, ligne 3 - ligne 39; figure 2 -----	1-3,6-9
A	US 6 081 095 A (NAGATA TETSUYA ET AL) 27 juin 2000 (2000-06-27) abrégé colonne 15, ligne 33 - colonne 16, ligne 26; revendications 12,13; figure 18 -----	

# RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/EP2004/052325

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 5631534	A	20-05-1997	AUCUN	
US 5592067	A	07-01-1997	DE 69417385 D1	29-04-1999
			DE 69417385 T2	15-07-1999
			EP 0662744 A2	12-07-1995
			JP 7212984 A	11-08-1995
US 2002190692	A1	19-12-2002	AU 3295201 A	07-08-2001
			AU 3455101 A	07-08-2001
			AU 3455201 A	07-08-2001
			AU 3460901 A	07-08-2001
			CA 2398730 A1	02-08-2001
			EP 1295397 A1	26-03-2003
			EP 1262015 A1	04-12-2002
			WO 0156008 A1	02-08-2001
			WO 0156163 A1	02-08-2001
			WO 0156062 A2	02-08-2001
			WO 0156145 A1	02-08-2001
			US 2002145477 A1	10-10-2002
			US 2003090331 A1	15-05-2003
			US 6486871 B1	26-11-2002
			US 2002171575 A1	21-11-2002
US 6150795	A	21-11-2000	AU 2469001 A	14-05-2001
			CA 2390551 A1	10-05-2001
			EP 1230723 A1	14-08-2002
			JP 2003513605 T	08-04-2003
			TW 512568 B	01-12-2002
			WO 0133691 A1	10-05-2001
US 6081095	A	27-06-2000	JP 11262188 A	24-09-1999
			JP 2000083327 A	21-03-2000
			FR 2776139 A1	17-09-1999